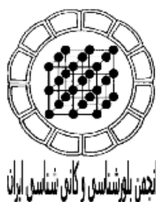
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال بیست و چهارم، شمارهٔ اول، بهار ۹۵، از صفحهٔ ۱۰۱ تا ۱۱۰



توزیع اندازه‌ی پورفیروبلاست‌های کیانیت و استارولیت در متاپلیت‌های حمزه قاسم و خزائی بالا (شاهیندژ) مؤید شرایط تبلور دگرگونی ناحیه‌ای در منطقه

منیر مجرّد*، صابر شیخ بگلو

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

(دریافت مقاله: ۹۳/۱۰/۲۳، نسخه نهایی: ۹۴/۳/۳)

چکیده: در این مقاله توزیع اندازه‌ی بلور (CSD) در ارتباط با پورفیروبلاست‌های کیانیت و استارولیت موجود در سنگ‌های متاپلیتی منطقه‌ی حمزه قاسم و خزائی بالا در شاهیندژ، بررسی شده است. برای کیانیت‌ها این منحنی به صورت خطی و برای استارولیت‌ها غیرخطی یا زنگوله‌ای است. کیانیت‌ها منحنی چگالی تراکمی یک سویه و استارولیت‌ها دارای دو بخش مجزا هستند. خطی بودن منحنی CSD کیانیت‌ها بیانگر سرعت بالای رشد هسته‌ها و یک دست بودن بلورهاست، و غیر خطی بودن منحنی‌های استارولیت بیانگر دو احتمال متفاوت در واکنش‌های تولیدکننده‌ی استارولیت و در فازهای دگرگونی ناحیه‌ای مسئول تشکیل کانی است که احتمال اول از قوت بیشتری برخوردار است. میانگین رشد در زمان (Gt) و نرخ هسته‌بندی (J) پورفیروبلاست‌های کیانیت به ترتیب برابر ۰٫۹۳۱ و $^{-۴}$۱٫۶mm- و برای پورفیروبلاست‌های استارولیت میانگین نرخ هسته‌بندی (J) بخش ریزبلور و درشت بلور به ترتیب $^{-۴}$۵٫۲۵mm و $^{-۴}$۶٫۱mm و میانگین رشد در زمان (Gt) برای ریز بلورها و درشت بلورها به ترتیب ۰٫۴۰۵mm.t و ۰٫۷۶۳mm.t برآورد شده است. نسبت هسته بندی بلورهای استارولیت ۵٫۵ برابر کیانیت و نسبت بزرگی بلورهای استارولیت به کیانیت ۱٫۸ برابر (حدود ۲ برابر) است.

واژه‌های کلیدی: *CSD؛ کیانیت؛ استارولیت؛ نرخ هسته بندی؛ سرعت رشد؛ شاهیندژ.*

مقدمه

اندازه‌ی بلور در یک سنگ بلورین، تابعی از دو عامل؛ نسبت رشد و زمان اقامت ماگما در لانه‌ی ماگمایی یا طول مدت یک واکنش دگرگونی است. بافت سنگ قادر است آگاهی‌هایی از چگونگی تبلور سنگ بیان کند با ذکر این مهم که بافت ممکن است از عملکرد چندین عامل حاصل شده باشد [۱].

اندازه‌ی بلور در سنگ‌های آذرین و دگرگونی محصول سرعت متفاوت رشد و طول زمان صرف شده برای رشد است. بنابراین منحنی تعداد بلورها نسبت به اندازه‌ی آن‌ها می‌تواند بازتاب دهنده‌ی سرعت تبلور باشد [۲-۴]. یکی از متداول‌ترین روش‌ها در اندازه‌گیری‌های بافتی، روش پراکندگی یا توزیع اندازه‌ی بلور (CrystalSizeDistribution) است که به اختصار به عنوان روش CSD شناخته شده است. CSD در واقع بازتاب کننده‌ی ویژگی ذاتی یک سنگ همچون چگالی و یا ترکیب سنگ است [۵]. بررسی توزیع اندازه‌ی بلورها در سنگ‌های آذرین و دگرگون به‌منظور بررسی سرعت و زمان تبلور به طور گسترده در دهه‌ی نود میلادی مورد استفاده قرار گرفته است [۶]. نظریه‌ی CSD اولین بار توسط لارسون و راندوف [۷] ارائه شد و اولین کاربرد زمین‌شناسی این تئوری توسط کاشمن و مارش [۸] در دریاچه‌های گدازه‌ای ماکوپولی صورت گرفته است [۷،۵].

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۴۴۳۲۹۷۲۱۳۴-۹۸+، نمابر ۰۴۴۳۲۷۵۳۱۷۲-۹۸+، پست الکترونیکی: m.modjarrad@urmia.ac.ir

انجماد، تبلور و وجود شیشه یک مسئله بزرگ در سنگ شناسی است [۹]. برای مثال ممکن است بلورهای کوچک حل شده و بلورهای بزرگ رشد کنند (رشد بافتی یا خروج از حالت تعادل). در ارتباط با CSD سنگ‌های آذرین، بررسی‌های متعددی صورت گرفت [۱۱،۱۰] ولی در ارتباط با پژوهش‌های CSD در مورد سنگ‌های دگرگون کاری صورت گرفته است [۱۲].

هدف از این پژوهش، بررسی CSD سنگ‌های دگرگون در ارتباط با متاپلیت‌های منطقه‌ی حمزه قاسم و خـزائی بـالاست. نتـایج حـاصل از ایـن بررسی‌ها نشان می‌دهد که اندازه‌گیری‌های صورت گرفته می‌تواند تأیید کننده‌ی دگرگونی ناحیه‌ای منطقه و نیز بیانگر تفاوت در نرخ هسته‌بندی و درشت شدگی بلور در کانی‌های مختلف مانند کیانیت و استاورولیت باشد.

روش بررسی

کاشمن و مارش [۸] نظریه‌ای در مورد توزیع اندازه‌ی بلور ارائه کرده‌اند. این نظریه به‌طور عمومی به نام CSD نامگذاری شده است. روش CSD اصول ابتدائی را برای توجیه متغییرهای زمان هسته‌بندی و رشد در سیستم‌های دینامیک ماگمایی و دگرگونی را فراهم کرده است [۶].

هسته‌ی اصلی بررسی‌های CSD عبارت از یک نمودار نیمه لگاریتمی چگالی تراکمی حجمی بلـورها بر واحد اندازه‌ی بلور است [۱۳]. در این ۱۴ مقطع نـازک از متاپلیت‌های حمزه قاسم و خزایی بالا که دارای شرایط بافتی و بلوری مناسب برای بررسی‌های CSD بودند، انتخاب شدند. از بیـن این مقـاطع از ۶ مقطـع تصویربرداری کامل صورت گرفت. سپس از برنامه Digimizer بـرای پردازش عکس و محاسبه‌ی مساحت، طول، عرض و گردشدگی بلورها استفاده شد. نتایج این پردازش تصویری در جدول‌های ۱ و ۲ خلاصه شده‌اند. پس از آن، داده‌های به دست آمده با استفاده از برنامه CSDcorreations از هیگنز [۱۴] نمودارهای CSD تهیه شدند.

جدول ۱ داده‌های حاصل از آنالیز تصویری استارولیت و کیانیت با نرم افزار Digimizer (واحد ها بر حسب mm).

HQ۲۲, Ky				HQ۶, St			
گردشدگی	عرض	طول	مساحت	گردشدگی	عرض	طول	مساحت
۰٫۴۵۸۵۶	۱٫۲۱۱۳۴	۱٫۹۶۴۵۶	۲٫۱۹۴۳۵	۰٫۶۰۹۷۸	۰٫۲۶۱۸۹	۰٫۳۸۲۳۵	۰٫۰۵۶۷۶
۰٫۶۰۹۷۸	۱٫۵۲۷۶۵	۰٫۷۵۱۸۷	۰٫۳۶۷۸۵	۰٫۵۶۴۵۳	۰٫۲۱۷۶۵	۰٫۴۱۰۵۴	۰٫۱۶۰۱۲
۰٫۳۸۷۰۷	۰٫۷۶۵۰۹	۰٫۳۸۴۶۵	۱٫۲۰۴۶۵	۰٫۴۵۸۵۶	۰٫۱۳۹۸۷	۰٫۱۸۹۰۸	۰٫۰۷۶۵۶
۰٫۴۱۰۵۴	۱٫۱۹۶۸۷	۱٫۱۵۶۵۴	۰٫۸۹۵۰۶	۰٫۴۵۳۲۸	۰٫۱۰۷۸۵	۰٫۱۹۳۲۴	۰٫۰۱۲۳۴
۰٫۳۷۸۶۵	۱٫۰۹۶۵۷	۱٫۹۸۸۵۴	۱٫۸۹۷۶۵	۰٫۶۵۴۳۴	۰٫۱۲۱۰۸	۰٫۱۷۵۳۴	۰٫۰۱۶۵۴
۰٫۴۳۸۶۵	۰٫۳۷۸۶۵	۱٫۸۱۸۵۴	۴٫۰۴۷۶۵	۰٫۵۶۵۴۸	۰٫۰۷۷۸۷	۰٫۰۸۶۷۵	۰٫۰۳۵۴۶
۰٫۵۶۷۶۵	۰٫۶۹۸۷۱	۲٫۱۴۰۲	۲٫۲۵۷۹۷	۰٫۶۹۸۷۱	۰٫۰۷۸۹۵	۰٫۰۹۷۶۵	۰٫۰۰۳۴۲
۰٫۴۵۸۷۶	۱٫۵۱۳۵۴	۱٫۹۹۶۸۶	۱٫۱۹۶۸۷	۰٫۳۸۷۰۷	۰٫۰۷۳۴۵	۰٫۰۹۴۴۵	۰٫۰۰۳۳۵
۰٫۶۰۶۶۴	۰٫۱۷۵۳۴	۱٫۵۲۷۶۵	۰٫۸۰۳۶۵	۰٫۳۶۴۵۳	۰٫۰۵۵۷۶	۰٫۱۱۸۵۶	۰٫۰۰۵۴۳
۰٫۴۵۸۵۶	۰٫۳۸۹۰۸	۱٫۵۵۰۰۶	۰٫۷۵۱۶۷	۰٫۶۷۴۲۴	۰٫۲۵۲۴۳	۰٫۳۸۹۰۸	۰٫۰۶۸۷۶
۰٫۵۶۴۵۳	۰٫۶۷۴۲۴	۱٫۲۱۱۳۴	۰٫۵۵۷۹۸	۰٫۵۵۴۰۹	۰٫۱۲۴۷۳	۰٫۱۶۰۹۸	۰٫۰۰۸۹۷
۰٫۶۰۶۶۴	۱٫۲۵۶۳۴	۱٫۵۱۳۵۴	۰٫۸۱۹۵۵	۰٫۴۳۸۶۲	۰٫۲۶۷۸۴	۰٫۳۷۸۶۵	۰٫۰۵۰۶۷
۰٫۴۵۳۲۸	۰٫۴۹۸۵۶	۱٫۴۰۷۶۵	۰٫۷۱۰۵۶	۰٫۶۲۹۶۶	۰٫۰۴۶۸۹	۰٫۱۱۳۹۸	۰٫۰۰۹۸۷
۰٫۴۸۶۲۸	۰٫۳۸۹۰۸	۰٫۹۶۵۴۷	۰٫۴۴۲۸۷	۰٫۳۴۹۰۲	۰٫۰۷۷۰۸	۰٫۱۵۲۴۵	۰٫۰۰۴۵۶
۰٫۴۵۸۵۶	۰٫۲۴۳۳۶	۳٫۱۹۸۷۶	۰٫۲۵۴۶۳	۰٫۵۰۷۶۴	۰٫۱۹۵۶۴	۰٫۲۴۳۳۶	۰٫۰۲۰۶۵
۰٫۸۵۶۶۸	۰٫۷۱۰۵۶	۰٫۷۶۵۰۹	۱٫۲۵۶۳۴	۰٫۶۰۶۶۴	۰٫۱۶۷۵۴	۰٫۲۸۷۶۷	۰٫۰۷۰۹۸
۰٫۳۳۸۶۴	۰٫۰۵۱۴۳	۱٫۷۶۳۰۵	۱٫۰۹۶۵۷	۰٫۴۳۸۶۵	۰٫۲۸۵۶۵	۰٫۳۱۶۷۵	۰٫۰۵۱۴۳
۰٫۴۹۸۵۶	۰٫۹۹۶۲۳	۲٫۵۵۵۴۹	۰٫۴۹۸۵۶	۰٫۶۹۸۷۱	۰٫۰۷۰۹۸	۰٫۰۹۴۵۶	۰٫۰۵۳۴۵
۰٫۴۰۸۷۶	۰٫۵۶۵۴۸	۰٫۸۱۹۵۵	۲٫۶۵۶۷۸	۰٫۴۵۸۵۶	۰٫۰۹۰۶۵	۰٫۱۷۸۹۸	۰٫۰۰۶۵۷
۰٫۵۸۷۶۵			۱۹٫۶۵۷۴۶	۰٫۵۵۹۰۸			۰٫۹۹۶۲۳

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.8.0]

جدول ۲ داده‌های حاصل از برنامه CSD corrections از هیگنز [۱۷] (واحد ها بر حسب mm) که برای رسم منحنی استفاده شدند.

شماره نمونه	مساحت پوشیده شده بوسیله‌ی کانی(mm^2)	مساحت پوشیده شده ٪	شیب منحنی (-۱/Gt)	مقدار عرض از مبداء ($Lnn(mm^{-4})$)	Log(Gt)
			پورفیروبلاست		
HQ۲Ky	۸۳٫۲	۵٫۹۲	۱٫۱۱۹	-۱٫۳	-۰٫۱۱۹
HQ۲۲Ky	۳۵٫۰۳	۲٫۵	۰٫۵۹۴	۰٫۱	-۰٫۱۵۳
HQ۱۰Ky	۲۴٫۸۴	۱٫۷۷	۱٫۳۸۵	-۳٫۵	-۰٫۲۰۲
HQ۴Ky	۸۲٫۵۴	۵٫۸۹	۱٫۱۲۸	-۱٫۷	-۰٫۱۱۵
شماره نمونه	مساحت پوشیده شده توسط کانی(mm^2)	مساحت پوشیده شده ٪	شیب منحنی (-۱/Gt)	مقدار عرض از مبداء ($Lnn(mm^{-4})$)	Log(Gt)
HQ۱۴ St	۱٫۳۲۳	۰٫۰۹۴۵	-۳٫۹۰۶	۵٫۱	-۰٫۴۹۱
HQ۶ St	۰٫۹۹۶	۰٫۰۷۱۱	-۳٫۱۴۳	۵٫۴	-۰٫۳۲۴

بحث و بررسی

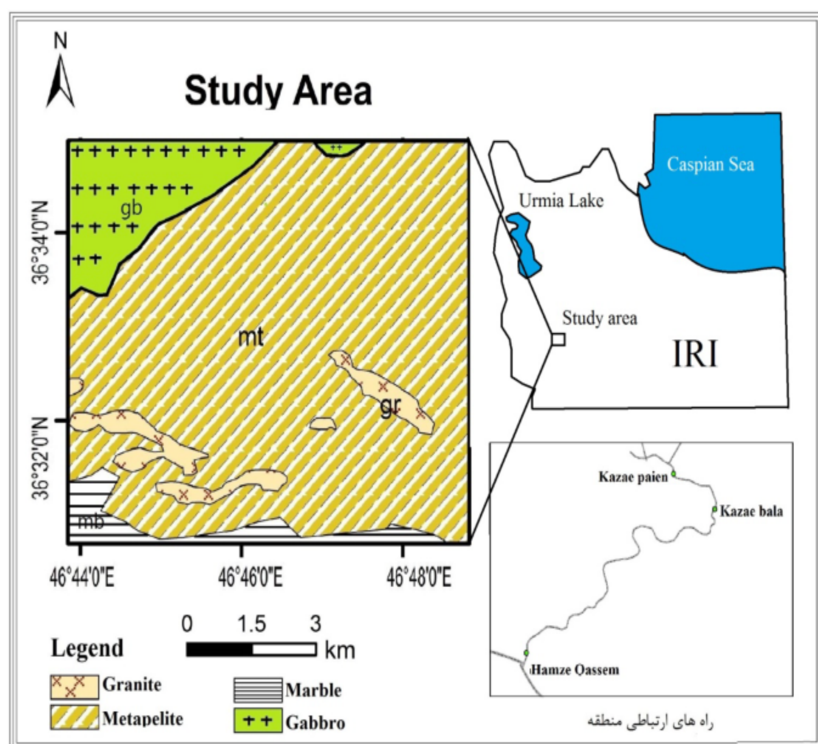
موقعیت زمین‌شناسی منطقه

منطقه‌ی مورد بررسی در جنوب شرقی شهرستان شاهیندژ در جنوب استان آذربایجان غربی قرار دارد. این منطقه با استفاده از منطقه بندی آقانباتی [۱۵] در ناحیه‌ی ایران مرکزی واقع شده است. در شرق منطقه‌ی مورد بررسی، متاپلیت‌های میلونیتی شده نیز مشاهده شده‌اند [۱۶] (شکل ۱).

بررسی‌های سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که سنگ‌های متاپلیتی منطقه از نوع استارولیت- کردیریت- کیانیت شیست هستند. سنگ رسوبی اولیه از نوع گری وکی و شیلی است [۱۷]. در این شیست‌ها کردیریت‌ها، کیانیت‌ها و استارولیت‌ها در زمینه‌ی میکا و کوارتز قرار دارند. رشد کیانیت‌ها و کردیریت‌ها در متن سنگ‌های ریزدانه با بافت پورفیروبلاستی صورت گرفته است.

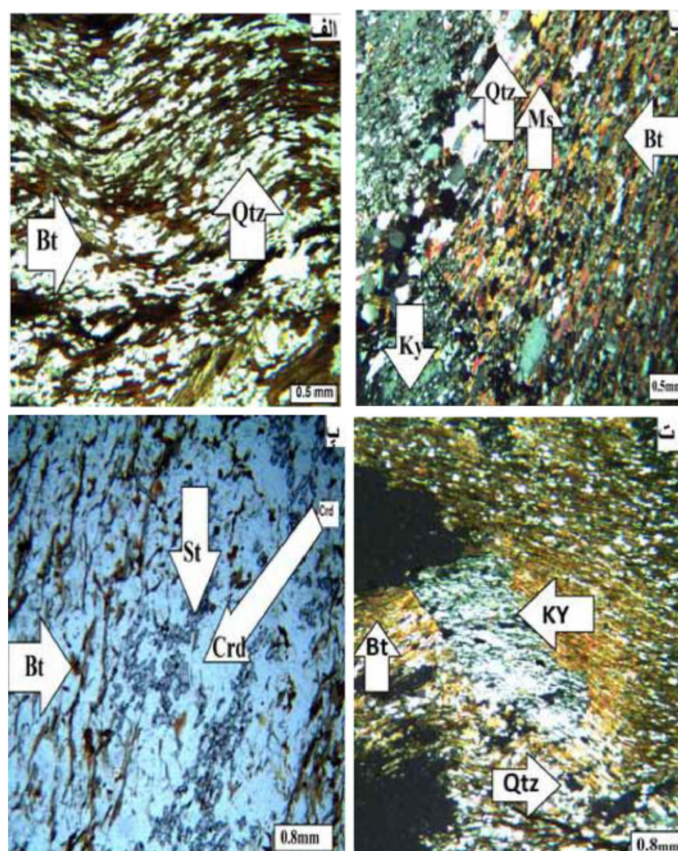
سمتگیری کانی‌های بیوتیت، مسکویت و کلریت طی دگرگونی ناحیه‌ای سبب تشکیل بافت شیستوزیته در متاپلیت‌ها شده است (شکل ۲). برای بررسی CSD تصاویر کلی از مقاطع میکروسکوپی تهیه و مورد بررسی قرار گرفته‌اند (شکل ۳).

این اولین بحث توزیع اندازه‌ی بلور در مورد سنگ-های متاپلیتی منطقه حمزه قاسم و خزائی بالاست.

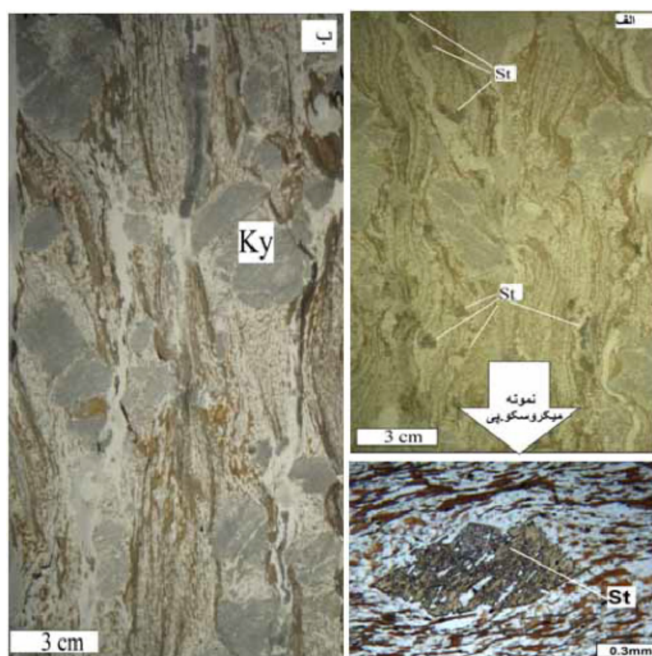


شکل ۱ نقشه‌ی موقعیت منطقه‌ی مورد بررسی اقتباس از خلقی و همکاران [۱۶].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.8.0]



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های متاپلیتی منطقه. الف- شیستوزیته غالب در متاپلیت‌ها. ب- کانی‌های موجود در متاپلیت‌ها را نشان می‌دهد. پ- پورفیروبلاست‌های استارولیت و کردیریت را به صورت تشکیل دوگانه با هم نشان می‌دهد. ت- پورفیروبلاست کیانیت در نمونه‌های متاپلیتی را مشخص می‌کند. تصاویر الف و پ در حالت PPL و ب و ت در حالت XPL تهیه شده‌اند.



شکل ۳ تصاویر کامل از مقاطع نازک.با استفاده از این مقاطع و برنامه آنالیز تصویری Digimizer داده‌های لازم برای ترسیم منحنی‌های CSD محاسبه شده است. شکل الف مربوط به کانی استارولیت و شکل ب مربوط به کانی کیانیت است. به علاوه شکل میکروسکوپی استارولیت نیز آورده شده است.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.8.0]

توزیع اندازه بلور (CSD)

توزیع اندازه‌ی بلور دانشی است که به بررسی شرایط تشکیل بلور در محیط‌های متفاوت (آذرین، دگرگونی و محیط‌های دیگر) می‌پردازد. این دانش در ارتباط با سرعت رشد، نرخ هسته‌بندی، نسبت ابعاد بلورها و چگالی حجمی بلورها اطلاعاتی را ارائه می‌دهد. نمودارهای وابسته به این بررسی-هادارای پارامترهای نرخ هسته بندی (J)، چگالی تراکم حجمی (Ln(n)) و سرعت رشد (G) است.

نرخ هسته بندی در نمودارهای توزیع اندازه‌ی بلور محور Y است که بیانگر میزان هسته بندی بلورهاست. چگالی تراکمی حجمی بلورها میزان غلظت و فراوانی بلورها در واحد حجم را بیان می‌کند. سرعت رشد (G) از شیب خط مماس بر منحنی توزیع اندازه بلور به دست می‌آید. با تعیین شیب خط منحنی می‌توان فاکتور حاصل از ضریب رشد در زمان (Gt) و در ادامه نرخ هسته بندی را با استفاده از روابط زیر محاسبه کرد.

$$n = dN / dL$$
$$n_0 = dN / L$$
$$L = 0$$

$$J = dN / dt$$
$$L = 0$$
$$J = n_0 G$$

$$n = n_0 e^{-bl}$$
$$m_0 = N_T = \int_0^\infty n_0 e^{-bl} dL = n_0 / b$$
$$m_l = L_T = n_0 / b^2$$
$$\overline{L} = L_T / N_T = 1/b$$
$$\bar{t} = \overline{L} / \overline{G}$$
$$\bar{J} = N_T / \bar{t}$$

در این روابط n شیب خط مماس بر منحنی CSD است. با استفاده از این روابط می‌توان پارامترهای نامبرده را محاسبه کرد. بررسی بافتی در سنگ شناسی سنگ های آذرین در قرن ۱۹ توسعه یافت که پیرو گسترش بررسی‌های سنگ نگاری و میکروسکوپی است. بررسی‌های CSD سنگ‌های آذرین و دگرگون به دلیل اینکه یک روش کمّی در فرایندهای آذرین و در تکمیل بررسی‌های ژئوشیمی است، اخیراً بیشتر رواج یافته است. دلیل دیگر رواج آن استفاده از نرم افزارها در جهت سهولت محاسبه‌ی CSD است [۱۸]. در مورد پورفیروبلاست-های سنگ‌های دگرگون، تعیین پارامترهای عددی، مثل اندازه-ی بلور و نوع بافت، لازم است.

بنابر محاسبات دوبعدی و برنامه‌ی CSDcorrections، مساحت بزرگترین بلورهاو میانگین نرخ هسته‌بندی (J) پورفیروبلاست‌های کیانیت به ترتیب برابر $۱٫۰۵۶۵mm^{-۲}$، $۱٫۶mm^{-۴}$- و برای پورفیروبلاست‌های استارولیت میانگین نرخ هسته‌بندی بخش ریز بلور و درشت بلور به ترتیب $۵٫۲۵mm^{-۴}$ و $۶٫۱mm^{-۴}$ برآورد شده‌اند. با تعیین شیب خط منحنی بلورها، مقدار رشد بلور در زمان (Gt) برای پورفیروبلاست‌های کیانیت ۰٫۹۳۱(mm).t و برای ریز بلورها و درشت بلورهای استارولیت به‌ترتیب ۰٫۴۰۵ (mm).t و ۰٫۷۶۳ (mm).t براورد شده است. نسبت هسته‌بندی استارولیت به کیانیت ۵٫۵ برابر و نسبت بزرگی کیانیت به استارولیت (حدود ۲) ۱٫۸ تعیین شده است. بنابراین می‌توان گفت که بلورهای استارولیت هسته‌های بیشتری نسب به کیانیت داشته است که نسبت به بلورهای کیانیت حدود ۲ برابر بزرگ‌تر از بلورهای استارولیت است. نسبت هسته‌بندی پایین کیانیت به استارولیت به دلیل شرایط تشکیل کیانیت در فشارهای بالا (بیش از ۷ کیلوبار) است، در حالی که منطقه‌ی مورد بررسی جزء مناطق فشار پایین تا متوسط است [۱۰]. بنابراین هسته‌بندی کیانیت‌ها نیز دلیلی بر شرایط دگرگونی فشار پایین تا متوسط در منطقه‌ی مورد بررسی است.

پ- شکل الگوی CSD

در این پژوهش، داده‌های کیانیت و استارولیت از ۶ مقطع نازک از سنگ‌های متاپلیتی منطقه‌ی حمزه قاسم و خزائی بالا تهیه شده‌اند. با استفاده از داده‌های عددی مربوط به پورفیروبلاست‌های کیانیت و استارولیت، نمودارهای فراوانی بلورها نسبت به اندازه‌ی آن‌ها تهیه شده‌اند. در نمونه‌های کیانیتی نمودارهای فراوانی، نشان دهنده‌ی درصد بالای بلورهای ریز کیانیت است (شکل ۴ الف تا د) که نسبت به نمودارهای فراوانی استارولیت‌ها یک کاهش و سپس یک افزایش را نشان می‌دهد. این کاهش و افزایش اندازه‌ی ذرات بیانگر تغییر شرایط رشد استارولیت طی فرایند دگرگونی است (شکل ۴ و، ه).

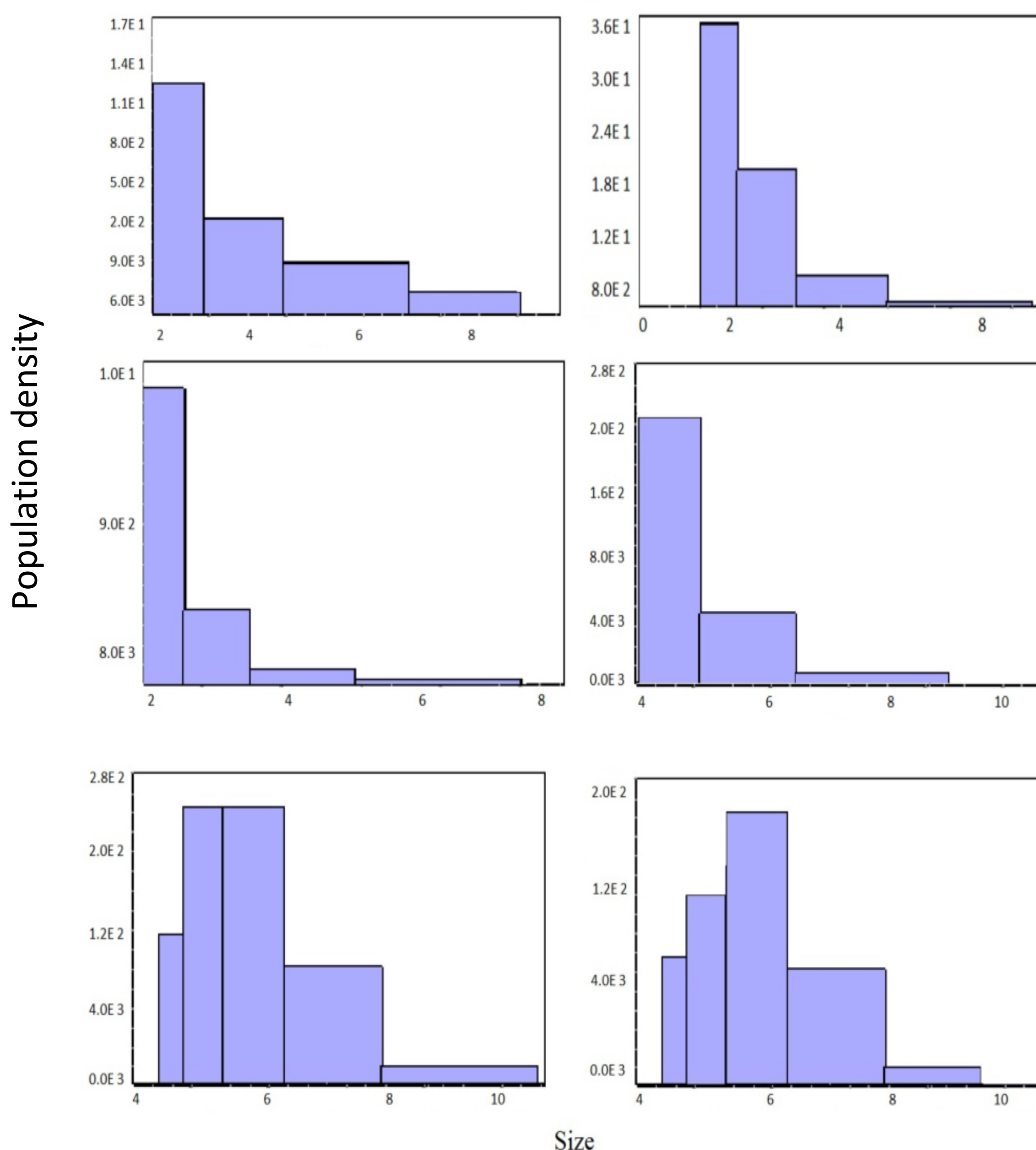
طول بلور (L) با استفاده از محور بزرگ بلور تعیین شده است. داده‌های آماری با بررسی‌های هیگنز [۱۹] مقایسه شده‌اند.

منحنی‌های تراکم حجمی ترسیم شده از متاپلیت‌های حمزه قاسم و خزائی بالا برای کیانیت‌ها خطی و برای استارولیت‌ها غیر خطی است (شکل‌های ۵ و ۶). این دو منحنی با روند و شیب متفاوت در شرایط دگرگونی یکسان نیازمند تفسیر جداگانه‌ای است. در ارتباط با خطی بودن منحنی‌های

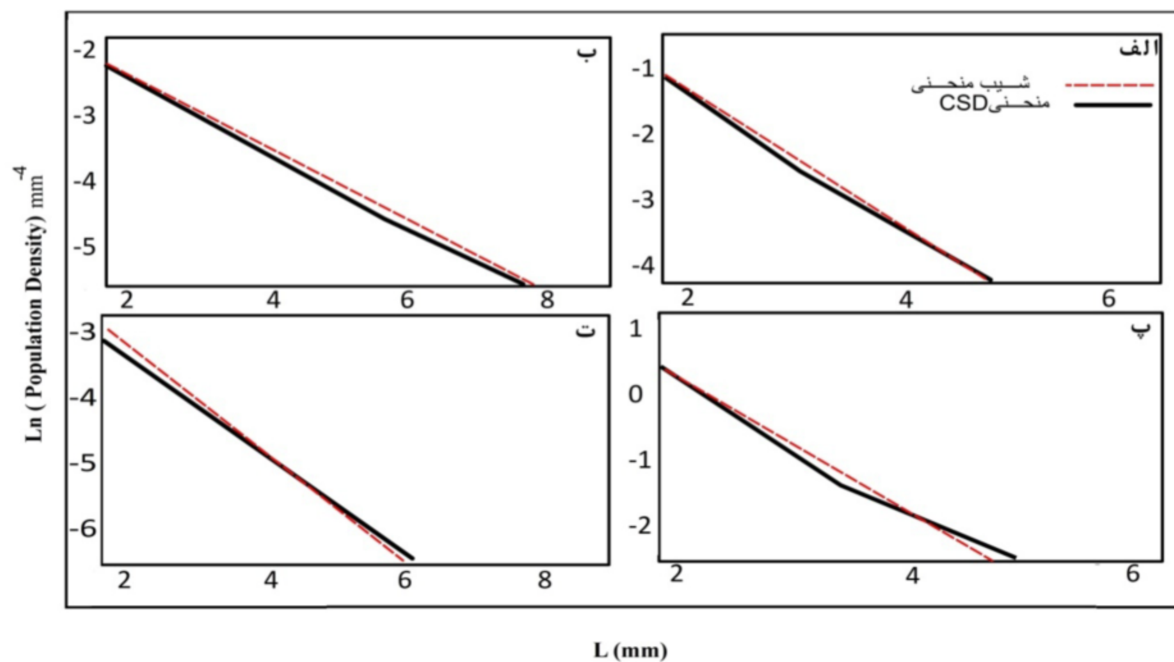
[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.8.0]

توزیع اندازه‌ی بلورها، نظرها و پیشنهادهایی ارائه شده‌اند. وجود شرایط مناسب برای رشد و انتشار مواد، هسته‌بندی سریع، سرعت رشد بالا و تسهیل حمل و نقل مواد در رشد بلورها در زمان کم باعث تشکیل منحنی های خطی (نسبتاً خطی) می-شود [۲۰].

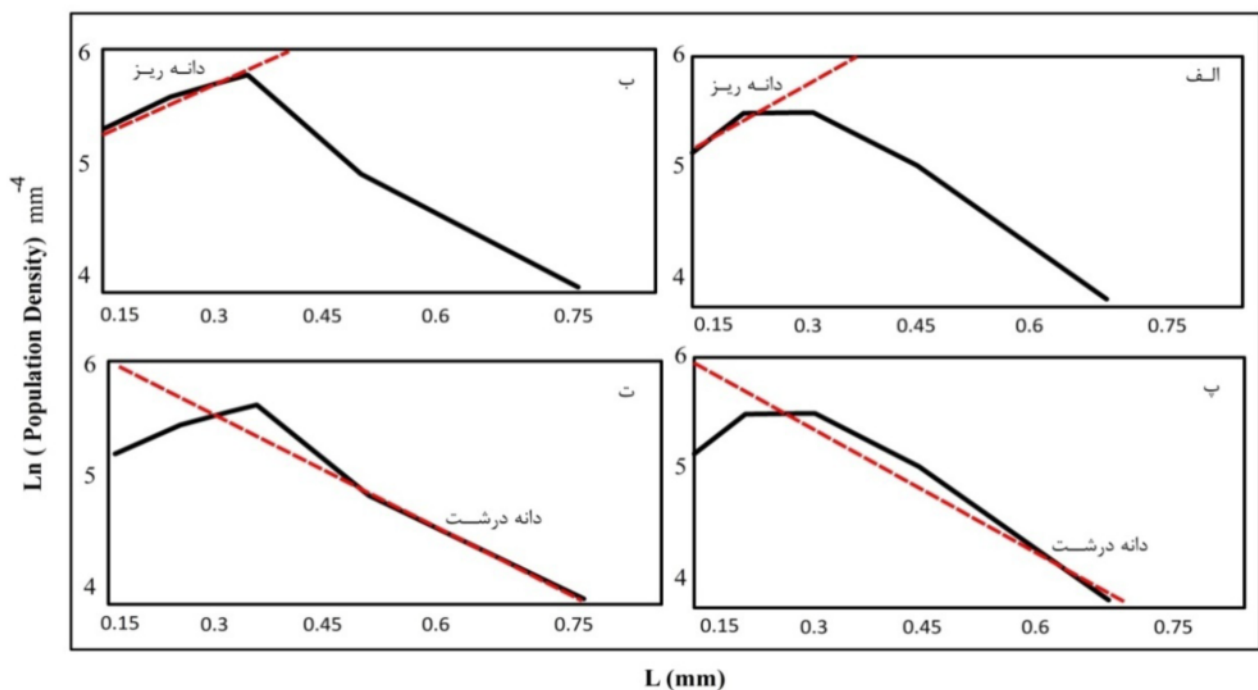
حداقل ۶ تفسیر درباره‌ی مقعر (زنگوله‌ای) بودن CSDها پیشنهاد شده‌اند [۱۹]. انباشت بلورها و وابستگی نسبت رشد به اندازه‌ی بلور یک مسئله همیشگی است. فرایندهای دیگری نیز روند معقری بودن منحنی‌های CSD را ایجاد می-کند برای مثال بلورهای ریز حذف شده و برای رشد بلورهای درشت دانه مصرف شده است. تغییرات ناگهانی در سری تبلور نیز می‌تواند حالت معقری بودن در منحنی‌های CSD را ایجاد کند.



شکل ۴ نمودارهای فراوانی بلورهای کیانیت و استارولیت. نمودارهای (الف تا د) مربوط بلورهای کیانیت. نمودارهای (و، ه) مربوط به بلورهای استارولیت است. محور Y نمودار بیانگر تعداد بلور در حجم (mm^{-2}) و محور X بیانگر طول بلور (mm) است. نمودارهای استارولیت نشاندهنده‌ی دو نوع بلور درشت دانه و ریز دانه است که هرکدام از آنها در شرایط خاصی رشد کرده‌اند.



شکل ۵ الـف تـا د منحنـی‌های CSD کیـانیت. محور Y نمودار بیانگر چگالی تراکمی (mm^{-4}) و محور X بیانگر طول بلور (mm) است. روی نمـودار CSD، شیب خط پسروی (b) اطلاعاتی را برای سنجیدن رشد کانی، میانگین نرخ هسته‌بندی، چگالی هسته بندی و نسبت هسته بندی به رشد (J/G) را ارائه می‌کند.



شکل ۶ الـف تـا د منحنـی‌های CSD استارولـیت. منحنی الف و ب نشانگر عرض از مبداء استارولیت‌های ریز بلور، منحنی‌های ج و د نشانگر استارولیت‌های درشت بلور. محور Y نمودار بیانگر چگالی تراکمی (mm^{-4}) و محور X بیانگر طول بلور (mm) است. نمونه های استارولیتی به دلیل اینکه دارای دو بخش مجزا هستند بنابراین برای هر بخش شیب خط مجزائی اندازه‌گیری شده است. شیب منفی برای بلورهای درشت دانه و شیب منفی برای بلورهای ریز دانه رسم شده است.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.8.0]

تبلور آرام در عمق و سپس تبلور سریع در یک مسیر نیز سبب ایجاد حالت معقری در نمودار CSD می‌شود. شرایط پیچیده دما و فشار در دگرگونی ناحیه‌ای نیز نمودارهای توزیع اندازه‌ی بلورها را به شکل مقعر و زنگوله‌ای مبدل می‌کند. به عقیده‌ی کاشمن [۲۰] خمیدگی منحنی CSD در اثر تبلور متوالی (در چند مرحله) نیز می‌تواند مسبب این خمیدگی باشد.

ویژگی معمول منحنی‌های استارولیت و کیانیت بیانگر تفاوت در سرعت رشد و نرخ هسته‌بندی این دو کانی در شرایط دگرگونی مشابه است. این الگو نشان می‌دهد کانی‌های مختلف در شرایط یکسان و عوامل دگرگونی مشابه با پارامترهای متفاوت و قابلیت رشد متغیر روبرو هستند. کانی‌هایی باترکیب ساده شرایط مناسب و متفاوت برای رشد دارند. بلورهای کیانیت طی واکنش‌های $Prl = Als + Qtz + H_2O$ و $Ms + Qtz = Kfs + Als + H_2O$ تشکیل شده‌اند. منحنی استارولیت به احتمال زیاد به دلیل تفاوت در واکنش‌های تشکیل دهنده، به صورت زنگوله‌ای در آمده است. واکنش‌هایی که تشکیل دهنده‌ی استارولیت‌ها هستند عبارتند از: $Ms + Chl = Bt + St + Qtz + H_2O$ و $Ms + Bt = St + Crd + H_2O$ [۲۱]. احتمالاً بازوی با شیب مثبت منحنی مربوط به استارولیت‌ها طی واکنش $Ms + Chl = Bt + St + Qtz + H_2O$ ایجاد شده است. در این واکنش، بلورهای ریز استارولیت رشد کرده و منحنی در این شرایط دارای شیب مثبت است.

شیب مثبت در این حالت نشان دهنده‌ی رشد بلورهای ریز دانه در طول زمان کم با هسته‌بندی زیاد است. در ادامه با اتمام کلریت، واکنش‌های تشکیل استارولیت نیز تغییر یافته و واکنش $Ms + Bt = St + Crd + H_2O$ بلورهای درشت دانه استارولیت را تشکیل داده است. طی این واکنش، شیب منفی در منحنی تشکیل شده است. این شرایط نیز بیانگر هسته‌بندی کم و رشد بلورهای درشت دانه است. همچنین این احتمال وجود دارد استارولیت که طی یک واکنش مشترک به همراه کردیریت تولید شده ریزتر بوده‌اند. دلیل این امر ممکن است صرف شدن مواد برای تولید دو کانی مافیک به صورت همزمان باشد.

برداشت

متاپلیت‌های حمزه قاسم و خزائی بالا دستخوش دگرگونی ناحیه‌ای شده‌اند و طی این دگرگونی پورفیروبلاست‌های کیانیت و استارولیت شکل گرفته‌اند. سری آنالیزهای کمّی پورفیروبلاست‌های کیانیتی و استارولیتی در متاپلیت‌های حمزه قاسم و خزائی بالا دو الگوی متفاوت رشد را نشان می‌دهند. کیانیت‌ها نرخ هسته بندی کم و رشد زیاد را نشان می‌دهد. نمونه‌های استارولیتی دارای دو بازوی با شیب متفاوت هستند. بخش ریز دانه نمونه‌های استارولیتی ممکن است در اثر یک فاز دگرگونی ناحیه‌ای با واکنش احتمالی $Ms + Chl = Bt + St + Qtz + H_2O$ تشکیل شده و رشد کرده باشند. نسبت به بخش درشت دانه موجود در منحنی استارولیت احتمالاً ناشی از یک واکنش مجزا $Ms + Bt = St + Crd + H_2O$ رشد کرده‌اند.

بررسی منحنی‌های CSD پورفیروبلاست‌های کیانیت و استارولیت و نتایج به‌دست آمده از نرخ هسته بندی، بیانگر تفاوت هسته‌بندی (J) کانی کیانیت با استارولیت است. بنابر محاسبات دوبعدی و برنامه‌ی CSDcorrections، مساحت برگترین بلورها و میانگین نرخ هسته‌بندی (J) پورفیروبلاست‌های کیانیت به ترتیب برابر $۱٫۰۵۶۵mm^{-2}$، $۱٫۶mm^{-4}$- و برای پورفیروبلاست‌های استارولیت میانگین نرخ هسته‌بندی بخش ریز بلور و درشت بلور به ترتیب $۵٫۲۵mm^{-4}$ و $۶٫۱mm^{-4}$ برآورد شده‌اند. با تعیین شیب خط منحنی بلورها، مقدار رشد بلور در زمان (Gt) برای پورفیروبلاست‌های کیانیت (mm).t ۰٫۹۳۱ و برای ریز بلورها ودرشت بلورهای استارولیت به ترتیب ۰٫۴۰۵(mm).t و ۰٫۷۶۳(mm).t براورد شده است. دلیل

اصـلی دو بـازو بـودن منحنـی های استارولیت‌ها تفاوت در واکنش‌های تشکیل دهنده‌ی آن است. نتایج حاصله با سرشت شرایط دگرگونی ناحیه‌ای همخوانی دارد. نسبت هسته‌بندی استارولیت به کیانیت ۵/۵ برابر و نسبت بزرگی کیانیت به استارولیت (حدود ۲) ۱/۸ تعیین شده است. بنابراین می‌توان گفت که بلورهای استارولیت هسته‌های بیشتری نسب به کیانیت داشته است. نسبت به بلورهای کیانیت حدود ۲ برابر بزرگ‌تر از بلورهای استارولیت است.

مراجع

[1] Moaazzen M., Modjarrad M., "*Contact metamorphism and crystal size distribution studies in the Shivar aureole, NW Iran*", Geol J 40 (2005) 499-517.

[2] Higgins M. D., Roberge J., "*Crystal size distribution (CSD) of plagioclase and amphibole from Soufriere Hills volcano, Monteserrat: evidence for dynamic crystallization textural coarsening cycles*", Journal of Petrology 44 (2003) 1401-1411.

[3] Winkler H. G. F., "*Crystallization of magma as recorded by variation of crystal size in dikes*", Mineral Mag 28 (1949) 557-574.

[4] Lane A. C., "*Studies of the grains of igneous intrusions*", Geol Soc Am Bull 14 (1902) 369-384.

[5] Gray N. C., "*Pure shear and simple shear deformation of inhomogeneous viscous fluids 2, The determination of the total finite strain in a rock from objects such as deformed pebbles*", Tectonophysics 5 (1970) 295-302.

[6] Higgins M. D., "*Quantitative textural measurement in igneous and metamorphic petrology*", Cambridge university press (2006) 265p.

[7] Marsh B. D., "*CSD in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization (II)*", Contrib Mineral Petrol 99 (1988) 292-305.

[8] Nkono C., Femenlas O., Diot H., Berza T., Demaiffe D., "*Flowage differentiation in an andesitic dyke of the Motru Dyke Swarm (Southern Carpathians, Romania) :Evidence from AMS, CSD and geochemical investigations*", Journal of Volcanology and Geothermal Research 154 (2006) 201-221.

[9] Morgan D. J., Jerram D. A., "*On estimating crystal shape for crystal size distribution analysis*" Journal of Volcanology and Geothermal Research 154 (2006) 1–7.

[۱۰] مجرّد م.،*"بررسی پترولوژی و خاستگاه ژئودینامیکی سنگ های دگرگونی و آذرین منطقهٔ سورسات (شرق شاهیندژ)- شمالغرب ایران"*، پایان نامهٔ دکتری، دانشگاه تبریز (۱۳۸۶) ۱۹۰ صفحه.

[۱۱] ترکیان ا.، صالحی ن.، کرد م.،*"استفاده از داده های آماری پراکندگی اندازهٔ بلورهای پیروکسن در مطالعهٔ فرآیندهای پترولوژی مراکز آتشفشانی شمال شرق قروه (کردستان)"*، مجلهٔ پترولوژی، شمارهٔ ۱۳(۱۳۹۱) صفحات ۳۳-۴۶.

[12] Sparks R., Sigurdsson H, Wilson L., "*Magma mixing: a mechanism for triggeringacid explosive eruptions*", Nature 267 (1977) 315-318.

[13] Cashman K. V., Marsh B. D., "*CSD in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization*". Contrib Mineral Petrol 99 (1988) 292-305.

[14] Higgins M. D "*Crystal size distribution corrections of softeware*", (2012).

[۱۵] آقانباتی ع.،*"زمین شناسی ایران. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور"*، انتشارات سازمان زمین شناسی، (۱۳۸۵) ۵۸۶ صفحه.

[۱۶] خلقی م. ح.، اقلیمی ب.، امینی آذر ر.، علوی نائینی م.،*"نقشهٔ زمین شناسی شاهین دژ ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی کشور"*، شمارهٔ ۵۳۶۳(۱۳۷۳).

[۱۷] مجرّد م.، مؤذن م.، مؤید محسن.،*"شیمی سنگ کل متاپلیت های شاهین دژ، زادگاه رسوبی و پاراژنزهای کانیایی"*،

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.8.0]

مجله پترولوژی، سال اول، شماره چهارم (۱۳۸۹) صفحات ۷۳-۸۸.

[18] Higgins M. D., "*Measurment of crystal size distributions*", American Mineralogist 85 (2000)1116- 1105.

[19] Higgins M. D.,"*Determination of crystal morphology and size from bulk measurmrntsonthin sections: numerical modeling*", American Mineralogist, 79(1994) 113-119.

[20] Cashman K. V., "*Relationship between plagioclase crystallization and cooling rate in basaltic melts*", Contributions to Mineralogy and Petrology, 113(1993) 126-142.

[21] Spear F.S., "*Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths*" Mineralogical Society of America (1993) Monograph.